

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

PEDRO BUDNY MACEDO

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO  
TRIPULADOS EM ATIVIDADES DE INSPEÇÃO MARÍTIMA

Joinville  
2018  
Pedro Budny Macedo

# **ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS EM ATIVIDADES DE INSPEÇÃO MARÍTIMA**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Weihmann

Joinville  
2018

# ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS EM ATIVIDADES DE INSPEÇÃO MARÍTIMA

Pedro Budny Macedo

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Joinville (SC), 06 de julho de 2018.

Banca Examinadora:

---

Prof. Lucas Weihmann, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Roberto Simoni, Dr.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Andrea Piga Carboni, Dr.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Meu primeiro e principal agradecimento é ao meu Deus, pois com Sua misericórdia e fidelidade proporcionou que eu chegasse até aqui. Apesar de minhas falhas e fraquezas, Ele sempre me susteve com Sua imensa Graça e Providência. Sem Ele, trabalho algum faria sentido e não seria possível. Sei que este é apenas o começo, mas desde já reconheço Seus feitos em minha vida.

A minha mãe Eliane Budny, minha grande cúmplice e amiga, cuja imensa sabedoria, amor e coragem me foram porto seguro para que eu pudesse seguir em frente.

Ao meu pai E. C. Macedo por ter instigado em mim a curiosidade e a não ter medo do diferente. Mesmo não estando mais aqui, é pulsante a sua inspiração para abraçar novos desafios.

Aos meus irmãos, Francisco, Esther e Vivian, por sempre estarem ao meu lado, sendo grandes amigos com os quais sei que poderei contar pelo resto da vida.

Expresso gratidão a toda minha família por estar presente em todos os momentos, desde as boas e confortantes alegrias até difíceis e árduas lutas. Aos meus tios, tias, avôs, avós, primos e primas, por todas as orações e palavras de motivação para continuar nesta caminhada.

Agradeço a minha amiga e irmã Línive Correa, que mesmo longe sempre esteve comigo, trazendo consigo sempre palavras sábias e significativas. Obrigado por toda a paciência, compreensão e por todo sono postergado para me ajudar neste trabalho.

Um enorme agradecimento aos meus colegas, que ao longo da caminhada, se transformaram em verdadeiros amigos, tornando minha trajetória mais leve e suave.

Aos amigos que compartilham comigo o pioneirismo do Congresso Nacional das Engenharias da Mobilidade: Evelyne Neia, Maria Eduarda Chame, Flávia Flores, Pedro Paludetto, Fabiano Ventura, Rodrigo Michels, Amarilis Laurenti e aos que, em edições seguintes, tem levado o propósito deste projeto adiante.

Agradeço aos companheiros do Rotaract Club de Joinville UFSC, por juntos lapidarmos nossas capacidades como jovens dispostos a transformar a realidade ao nosso redor, com o objetivo de colaborar para um mundo melhor.

Aos amigos e irmãos do Chi Alpha, por compartilharem comigo vivências que jamais irei esquecer. Por serem luz nos dias escuros e brisa fresca nos momentos de sufoco. Meu muito obrigado aos meus

irmãos Jully Giacomini, Tiago Martins, Gilmar Passos Jr, Pérsida da Rosa Siviero, Loide Oliveira e Ester Cavalheiro.

Obrigado a minha família da Igreja Presbiteriana de Joinville, por me receber com tamanha hospitalidade e amor. Ao Pr Joel Lino e sua família e as famílias Leão e Casas, meu agradecimento especial.

Agradeço especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Lucas Weihmmen, pela paciência e dedicação ao me auxiliar na concepção deste trabalho, em minha iniciação científica e por abrir portas para projetos futuros.

A todos os colegas de projeto e ao Prof. Dr. Roberto Simoni, com os quais tive o privilégio de aprender e evoluir juntamente em áreas que nos tiraram de nossas zonas de conforto.

Por fim, agradeço as empresas que disponibilizaram suas informações, e dedicando seu tempo para meus questionamentos, permitiram que este trabalho fosse elaborado.

“Se tomar as asas da alva, se habitar nas extremidades do mar, até ali a Tua mão me guiará e a Tua destra me susterá” (Salmos 139:9, 10).





## RESUMO

Atividades de vistoria subaquática são necessárias para a manutenção e operação de sistemas submersos e controle de ambientes marinhos, neste contexto surgem diversas soluções para as atividades de inspeção. O uso de veículos subaquáticos não tripulados (UUVs) possibilita que o ambiente marinho se torne cada vez mais acessível, aumentando o controle sobre estruturas e sistemas navais. Porém, operações em águas rasas são majoritariamente realizadas por mergulhadores. Neste trabalho foram analisadas e investigadas alternativas com UUVs para três operações submarinas costeiras atualmente realizadas. Por meio de informações fornecidas por prestadores de serviços de inspeção foram elaboradas simulações no programa ROS com o AUV Girona 500, visando à visualização e estipulação de tempo de uma inspeção realizada por um UUV, permitindo uma comparação entre diferentes estratégias de operação. Por fim, com base nos resultados obtidos, por meio das informações fornecidas pelas empresas e pela literatura foram indicados os prováveis fatores que limitam o uso de UUVs em operações de inspeção em águas rasas.

**Palavras-chave:** Inspeção em Águas Rasas. Monoboia. ADCP. Boia Meteoceanográfica. ROS.



## ABSTRACT

Underwater inspection activities are necessary for the maintenance and operation of submerged systems and control of marine environments, in this context arise several solutions for the inspection activities. The use of unmanned underwater vehicles (UUVs) enables the marine environment to become increasingly accessible, increasing control over marine structures and systems. However, shallow water operations are mostly performed by divers. In this work, UUVs were analyzed and investigated for three current coastal submarine operations. By means of information provided by inspection service providers, simulations were developed in the ROS program with the AUV Girona 500, aiming at the visualization and stipulation of time of an inspection performed by a UUV, allowing a comparison between different operating strategies. Finally, based on the results obtained, the information provided by the companies and the literature indicated the probable factors that limit the use of UUVs in shallow water inspection operations.

**Keywords:** Shallow Water Inspection. Single Point Mooring. ADCP. Meteo Oceanographic Buoys. ROS.

## **LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Simulação em Gazebo do Girona 500 .....                                      | 28 |
| Figura 2 - Sistema de uma Monoboia .....  | 33 |
| Figura 3 - Etapas de Inspeção de uma Monoboia .....                                     | 35 |
| Figura 4 - ADCPs em diferentes tipos de atividades.....                                 | 35 |
| Figura 5 - Etapas de Inspeção de ADCPs .....  | 37 |
| Figura 6 - Ilustração de Boias Meteoceanográficas .....                                 | 38 |
| Figura 7 - Etapas de Inspeção de Boias Meteoceanográficas.....                          | 39 |
| Figura 8 - Monoboia de São Francisco do Sul .....                                       | 41 |
| Figura 9 - Configuração de Amarras da Monoboia.....                                     | 42 |
| Figura 10 - Ilustração da Inspeção do PLEM e dos Mangotes.....                          | 43 |
| Figura 11 - ADCP HydroSurveyor.....   | 45 |
| Figura 12 - Ilustração da Inspeção de ADCPs com UUVs .....                              | 46 |
| Figura 13 - Boia Meteoceanográfica G-5000.....  | 47 |
| Figura 14 - Ilustração da Inspeção da Boia Meteoceanográfica com UUVs<br>.....          | 48 |
| Figura 15 – Simulações das Missões com o pacote de simulação do AUV<br>Girona 500. .... | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Sistemas de UUVs.....                                     | 23 |
| Tabela 2 - Atividades que empregam UUVs.....                         | 24 |
| Tabela 3 - Condições de uma Inspeção da Monoboia .....               | 34 |
| Tabela 4 - Características de Inspeção de ADCPs fundeados. ....      | 36 |
| Tabela 5 – Características de Operação em Boias Meteoceanográficas.. | 38 |
| Tabela 6 - <i>Waypoints</i> para Inspeção da Monoboia.....           | 44 |
| Tabela 7 - Sequência de <i>waypoints</i> para inspeção de ADCPs..... | 46 |
| Tabela 8 - Duração das Simulações no ROS.....                        | 49 |
| Tabela 9 - Análise de Benchmark das Condições de Operação .....      | 53 |
| Tabela 10 - Comparativo de Duração das Operações.....                | 54 |



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler  
ASC – Autonomous Surface Craft  
AUV – Autonomous Underwater Vehicle  
DEEP - Desenvolvimento de Tecnologias Emergentes na Exploração de  
Petróleo no Mar  
GPS - *Global Positioning System*  
IAUV – Intervention Autonomous Underwater Vehicle  
PLEM – Pipeline End Manifold  
ROS – Robot Operating System  
ROV – Remotely Operated Vehicle  
SAS - *Synthetic Aperture Sonar*  
SMF - Sondadores de Multifeixe  
SVL - Sonar de Varredura Lateral  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
UUV – Unmanned Underwater Vehicle





## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                      | <b>19</b> |
| 1.1          | Objetivos .....                              | 20        |
| <b>1.1.1</b> | <b>Objetivo geral .....</b>                  | <b>20</b> |
| <b>1.1.2</b> | <b>Objetivos específicos .....</b>           | <b>20</b> |
| 1.2          | Justificativa .....                          | 20        |
| 1.3          | Metodologia .....                            | 21        |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>           | <b>23</b> |
| 2.1          | Veículos Subaquáticos Não Tripulados .....   | 23        |
| 2.2          | Regulamentação de Mergulho Autônomo.....     | 25        |
| 2.3          | Robot Operating System .....                 | 26        |
| 2.4          | Aplicação de UUVs .....                      | 29        |
| <b>3</b>     | <b>CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES ATUAIS .....</b>   | <b>33</b> |
| 3.1          | Inspeção de uma Monoboia .....               | 33        |
| 3.2          | Inspeção de ADCPs Fundeados .....            | 35        |
| 3.3          | Inspeção de Boias Meteorológicas.....        | 37        |
| <b>4</b>     | <b>DESENVOLVIMENTO DE OPERAÇÕES COM UUVs</b> | <b>40</b> |
| 4.1          | Monoboia .....                               | 40        |
| 4.2          | ADCPs .....                                  | 45        |
| 4.3          | Boia Meteorológica.....                      | 47        |
| 4.4          | Simulações .....                             | 48        |
| <b>5</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>         | <b>51</b> |
| 5.1          | Análise das Condições de Operação .....      | 51        |
| 5.2          | Análise do Tempo de Trabalho em Campo.....   | 53        |
| <b>6</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>            | <b>55</b> |
| 6.1          | Trabalhos Futuros .....                      | 55        |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                     | <b>56</b> |
|              | <b>APÊNDICES.....</b>                        | <b>59</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

Diversas operações subaquáticas existem devido a interação do homem com ambientes aquáticos. Desde o controle ambiental até complexas operações em plantas de extração de petróleo offshore, as demandas dependem do constante aprimoramento das ferramentas e técnicas utilizadas. A qualidade da prestação de serviços submarinos instiga novas soluções para operações subaquáticas. Neste contexto, o interesse por robótica subaquática tem aumentado nos últimos anos, tanto no âmbito acadêmico como na indústria (ANTONELLI, 2006).

Segundo Manley (2016), apesar Veículos Subaquáticos Não Tripulados (UUV, do inglês *Unmanned Underwater Vehicles*) possuírem grande desenvolvimento por décadas, principalmente pela marinha americana, apenas nos últimos 20 anos têm sido empregados em operações comerciais. Sabe-se que estruturas e equipamentos adaptados para interagir com UUVs foram implementados em 2016, pois a transição entre a abordagem científica e a aplicação mercadológica exige estudos que apresentem possíveis resultados relevantes para empresas.

Frente ao desenvolvimento tecnológico, sistemas submarinos se tornaram mais sofisticados e hoje em dia podem ser controlados até por dispositivos portáteis, sendo é possível acompanhar a coleta de dados de boias meteoceanográficas em tempo real via internet em aplicativos para celular, por exemplo. Entretanto, o investimento dedicado em estruturas submersas é alto, pois depende de inspeções regulares que garantam o pleno funcionamento do sistema, além da tecnologia avançada aplicada aos equipamentos. Este investimento é possível para grandes empresas e operações em águas profundas. Por outro lado, operações em águas rasas ainda são realizadas por mergulhadores.

Nas abordagens militares, ambientais, acadêmicas e industriais, são diversas as aplicações de UUVs como: auxílio em instalação de plantas petrolíferas offshore, operações de resgate em alto mar, manutenção de estruturas submersas, controle ambiental de áreas afetadas pelo grande tráfego de navios, no monitoramento da diversidade biológica oceânica, entre outros. Dito isto, percebe-se a possibilidade de que estes veículos possam trazer benefícios para operações costeiras. Tendo isto em vista, neste trabalho foi analisada a viabilidade de que UUVs desempenhem certas atividades de inspeção de estruturas e equipamentos submarinos.

## 1.1 Objetivos

Neste tópico serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a efetividade do emprego de veículos subaquáticos em operações de inspeção marítimas industriais na região do norte de Santa Catarina e contrapor com os métodos atualmente utilizados.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Coletar informações de procedimentos atualmente empregados pela indústria marítima na região.
- Elaborar e simular operações alternativas utilizando UUVs como estratégias alternativas aos métodos tradicionais utilizando *Robot Operating System* (ROS).
- Comparar os aspectos das diferentes estratégias de vistoria marítima.

## 1.2 Justificativa

A ideia central do presente trabalho surgiu durante o período de iniciação científica no projeto de Desenvolvimento de Tecnologias Emergentes na Exploração de Petróleo no Mar (DEEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Joinville, onde se encontrou oportunidades para estudar aplicações de UUVs em atividades da região costeira de Santa Catarina.

Ao conhecer e realizar visitas em empresas de serviços oceanográficos e de mergulho da região, notou-se a necessidade de elaborar uma análise da aplicabilidade de UUVs para o setor. Essa análise teve embasamento nas informações de empresas prestadoras de serviços oceanográficos e com o trabalho de Sonaglio (2017).

Atualmente as operações aqui abordadas contam com mergulhadores para exercer o controle visual de estruturas e equipamentos. Porém, inspeções preventivas não necessariamente precisam ser realizadas por mergulhadores, podendo ser empregados UUVs.

Portanto, este trabalho apresenta uma análise quanto à viabilidade técnica e econômica de se utilizar UUVs em operações de inspeção

preventivas em águas rasas, baseando-se em aperfeiçoar o sistema atual de atividades oceanográficas.

### 1.3 Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido seguindo a metodologia descrita a seguir, que contempla as etapas de levantamento de informações, desenvolvimento de operações alternativas com UUVs, análise e discussão dos resultados obtidos.

- Etapa 1 – Conceitualização:

Busca-se compreender os conceitos utilizados no âmbito de inspeções subaquáticas vinculados às regulamentações impostas aos mergulhadores, aos veículos subaquáticos não tripulados e sistemas de desenvolvimento robótico, que foram necessários para a elaboração deste trabalho.

- Etapa 2 - Levantamento de dados:

Nesta etapa apresenta-se e descreve-se cada uma das operações analisadas, baseando-se em informações obtidas por meio de entrevistas e questionários feitos com as empresas prestadoras dos respectivos serviços e por revisão bibliográfica. Sendo os dados de inspeções em uma monoboia obtidos por revisão bibliográfica e as informações quanto inspeções em perfilhadores acústicos, conhecidos como ADCPs (do inglês, *Acoustic Doppler Current Profiler*) e Boias Meteoceanográficas por meio de contato direto com empresas.

- Etapa 3 – Desenvolvimento de operações:

Abordam-se as operações alternativas utilizando-se UUVs com base nos procedimentos realizados por mergulhadores. Por meio de simulações com o Pacote do AUV Girona 500 em ROS e da compilação de informações obtidas por estudos anteriores.

- Etapa 4 – Análise de Resultados:

Nesta etapa do trabalho mostram-se os prováveis resultados das operações ao serem realizadas por UUVs. Possibilitando a comparação e discussão entre os métodos atuais e alternativos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Veículos Subaquáticos Não Tripulados

Inicialmente é necessário conhecer os conceitos atrelados a veículos subaquáticos não tripulados. Estes podem ser definidos como robôs móveis que atuam em ambiente submarino, podendo ter seus movimentos remotamente controlados, ou de forma pré-programada (SONAGLIO, 2017).

De acordo com Lapierre (2006), os diferentes tipos de sistemas de UUVs existem devido à variedade de objetivos das missões para as quais são projetados. Estes objetivos interferem principalmente no sistema de funcionamento, desde a arquitetura de comunicação até a forma geométrica, resultando em diversos tipos de robôs com diferentes propriedades e possibilidades. A Tabela 1 apresenta os tipos de UUVs.

Tabela 1 - Sistemas de UUVs

| Tipo de Sistema  | Descrição   | Imagem  |
|--|---|---|
| <b>Remotely Operated Vehicle (ROV)</b>                   | Controlados por teleoperação, conectados por um cabo (denominado umbilical) e podem ou não possuir braços robóticos, com o objetivo de realizar inspeções e intervenções. |    |
| <b>Autonomous Underwater Vehicle (AUV)</b>               | Veículos autônomos com função apenas de inspeção.   |    |
| <b>Intervention Autonomous Underwater Vehicle (IAUV)</b> | Veículos autônomos com a presença de braços robóticos, possibilitando intervenções.   |   |
| <b>Autonomous Surface Craft (ASC)</b>                    | Veículos de navegação sobre a superfície da água, equipados com instrumentos de inspeção submarina.   |  |
| <b>Glider Systems</b>                                    | Veículos que navegam de acordo com controladores de profundidade e direção internos.  |  |
| <b>Biomimetizadores</b>                                  | Veículos que utilizam soluções naturais que apresentam boa hidrodinâmica.   |  |
| <b>UUVs Platoons</b>                                     | Sistema com a colaboração de diversos UUVs buscando a soma de vantagens e possibilidade da ação de todos.   |  |

Fonte: Sørensen e Ludvigsen (2015)

Fonte: Adaptado de Lapierre (2016).

Quanto as aplicações e limitações de cada um, Rocha (2012) ressalta a problemática envolvida quanto ao uso de ROVs e AUVs. O primeiro fornece maior controle de operação, sendo utilizados em sua maioria para atividade de intervenção, por conta da comunicação constante e da teleoperação, porém apresenta complexibilidade quanto ao manuseio e alcance do umbilical. Por outro lado, AUVs não possuem estas limitações físicas de navegação, por isso são empregados em operações de inspeção de grandes áreas. Rocha (2012) divide as atividades de UUVs em quatro grupos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Atividades que empregam UUVs

| <b>Tipo</b>                   | <b>Descrição</b>                                   |
|-------------------------------|--|
| <b>Científica</b>             | Coleta de amostras físicas, químicas e biológicas  |
|                               | Mapeamento do leito oceânico e das calotas polares |
|                               | Caracterização do perfil da coluna d'água          |
|                               | Exploração de sítios de grande profundidade        |
|                               | Transporte e operação de equipamentos de pesquisa  |
|                               | Arqueologia subaquática                            |
|                               | Ensaio não destrutivos                             |
|                               | Investigação de sítios de desastres                |
| <b>Ambiental</b>              | Monitoramento de propriedades da água              |
|                               | Monitoramento de espécimes biológicos              |
|                               | Remoção de destroços e detritos                    |
| <b>Militar</b>                | Investigação de locais de atração                  |
|                               | Contramedidas contra minas aquáticas               |
|                               | Busca e resgate de submarinos e armamento          |
|                               | Vigilância de portos e costa                       |
| <b>Industrial e comercial</b> | Lançamento e manutenção de cabos                   |
|                               | Inspeção de cabos e tubulações                     |
|                               | Manutenção de tubulações                           |
|                               | Construção e manutenção de estruturas offshore     |
|                               | Operação de painéis e válvulas                     |
|                               | Inspeção de cascos e tanques de navios             |
|                               | Inspeção de usinas nucleares                       |
|                               | Salvatagem   |

Fonte: Rocha (2012).



## 2.2 Regulamentação de Mergulho Autônomo

Conhecer o conceito de mergulho autônomo e a regulamentação que o rege é necessário para entender a estrutura envolvida atualmente nas operações de inspeção que serão analisadas. As operações subaquáticas que envolvam mergulhadores devem seguir as Normas da Autoridade Marítima para Atividades Subaquáticas (NORMAM 15, 2016) elaboradas pelo Departamento de Portos e Costas da Marinha do Brasil. Os objetivos dessas normas são habilitar mergulhadores e prestadoras de serviço de mergulho profissional e fiscalizar os serviços de mergulho. Mergulho autônomo é definido como:

“Aquele em que o suprimento de mistura respiratória é portado pelo próprio mergulhador e utilizado como sua única fonte respiratória. Não é permitido seu emprego em mergulhos com paradas para descompressão ou na presença de condições perigosas e/ou especiais.” (NORMAM 15, 2016, p.1-5)

A norma determina que a composição mínima da equipe de apoio para realização de mergulhos autônomos até 20 metros deve conter:

- Um supervisor de mergulho raso;
- Dois mergulhadores rasos para a execução do trabalho;
- Um mergulhador de emergência pronto para intervir;
- Um mergulhador raso auxiliar de superfície.

Segundo a NORMAM 15 (2016), mergulhos autônomos em profundidades de até 20 metros são limitados a trabalhos leves como: inspeções visuais, buscas por objetos e coleta de imagem submarina. Sendo que os requisitos mínimos para que este tipo de mergulho aconteça são:

- Conjunto duplo de cilindros de ar fabricados e testados hidrostaticamente de acordo com as normas da ABNT ou equivalentes, com pelo menos onze litros de volume hidrostático cada;
- Suspensório de segurança com alça para içamento do mergulhador;

- Colete de fluabilidade controlada, próprio para mergulho, e com suprimento independente do cilindro de ar de mergulho para enchimento em situações de emergência;
- Profundímetro;
- Faca de segurança;
- Roupas de mergulho apropriadas;
- Máscara facial do tipo *full face*, equipada com sistema de intercomunicação com a superfície (sem fio);
- Cinto de lastro com fivela de soltura rápida;
- Válvulas reguladoras para uso com máscara do tipo *full face*, caso aplicável;
- Relógio de mergulho;
- Compressor de ar de alta pressão com capacidade mínima de 150 kgf/cm<sup>2</sup> para carregamento dos cilindros de mergulho;
- Linha de vida (cabo guia) com pelo menos cem metros de comprimento e carga de ruptura de 150 kg, dotado de mosquetão de soltura rápida em uma das suas extremidades;
- Nadadeiras;
- Não é obrigatório que o compressor de ar utilizado pelo sistema esteja localizado no local do mergulho;

Portanto, baseados nas regulamentações descritas acima, atualmente os prestadores de serviços subaquáticos desenvolvem sua estrutura de operações.

### 2.3 Robot Operating System

Nesta seção serão abordados os conceitos relacionados ao Sistema Operacional de Robôs (ROS, do inglês Robot Operating System) que será utilizado para simular as operações com UUVs analisadas. Joseph (2015) define ROS como um conjunto de ferramentas, bibliotecas, convenções e *frameworks* de *softwares* de código aberto voltados para o desenvolvimento de robôs.

A utilização do ROS para a simulação de robôs tem se tornando cada vez mais presente, pois este facilita o desenvolvimento de robôs que sejam constituídos de diferentes módulos de funcionamento, tais como controles de posicionamento, sensores de coleta de dados e

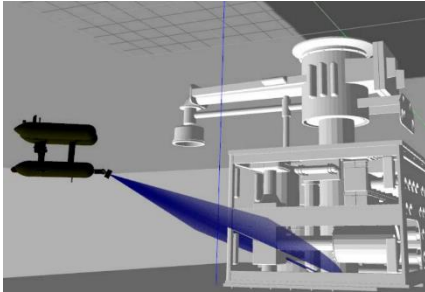
comunicação. Cada um destes módulos é relacionado a um pacote dentro da simulação e em seguida implementado aos robôs reais. Uma das vantagens deste sistema é a possibilidade de prever os comportamentos de um robô em posse de todos os seus subsistemas funcionando simultaneamente baseados em representações computacionais do ambiente real determinadas pelo desenvolvedor (JOSEPH, 2015).

De acordo com O’Kane (2014), a complexidade de simular robôs em três dimensões está na visualização das missões realizadas. Por isso, as ferramentas Gazebo e Rviz são soluções para a representação gráfica no ROS da operação que estiver sendo realizada pelo robô. O princípio de funcionamento desta ferramenta é ler os comandos fornecidos ao robô e sobrepor com as respostas do robô durante sua operação. Um exemplo de aplicação destas ferramentas é a utilização do ROS pelo grupo de pesquisas de Simulação Naval da UFSC para desenvolver a proposta de um ROV híbrido, capaz de realizar missões autônomas e teleoperadas.

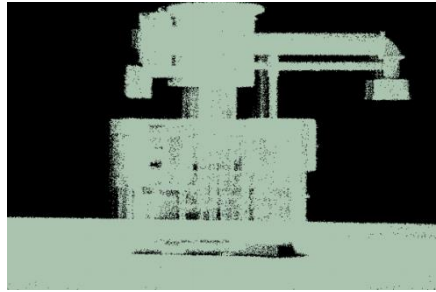
Em posse das capacidades oferecidas pelo ROS, Floriani, Palomeras e Weihmann (2017) propõem uma metodologia de planejamento de trajetórias para inspeções subaquáticas, baseada em algoritmos, que definem os melhores pontos de inspeção chamados *waypoints*. Foi utilizada uma simulação desenvolvida no programa ROS pela *Underwater Vision and Robotics Research Centre at the University of Girona* (UdG). Por meio da simulação foi possível obter resultados quanto a qualidade dos dados obtidos por meio da trajetória planejada com o uso de algoritmos. A Figura 1(a) apresenta a simulação do AUV Girona 500, que possui diversas configurações com capacidades para diferentes aplicações, desde coleta de dados até complexas intervenções submarinas. Na Figura 1(b) observa-se o resultado da leitura via *laser scan* da modelagem computacional de uma árvore natal molhada. Os dados gerados pelo *laser scan* posteriormente foram convertidos em uma nuvem de pontos e comparados com o modelo original.

Figura 1 - Simulação em Gazebo do Girona 500

(a)



(b)



Fonte: Floriani, Palomeras e Weihmann (2017).

O AUV Girona 500 é um veículo com flutuabilidade positiva equipado com um sonar multifeixe, com ângulo de inspeção de  $-90^\circ$  até  $45^\circ$  em um arco de  $120^\circ$  com 240 feixes, segundo Palomeras (2018). O pacote de sua simulação em ROS baseia-se em blocos de algoritmos e ferramentas programadas que representam a interação do AUV Girona 500 com o ambiente. Os códigos são *open-source* e podem ser modificados de acordo com as condições do usuário. Neste trabalho foram inseridas as trajetórias de navegação por meio de coordenadas geográficas de *waypoints*, pontos pelos que devem ser percorridos pelo veículo.

Neste trabalho o faz-se o uso da ferramenta Rviz para visualizar as simulações das operações do AUV Girona 500, com o objetivo estimar o tempo da trajetória percorrida pelo robô frente a possíveis erros de posicionamento. Foram empregadas as mesmas configurações de navegação utilizadas pelos desenvolvedores.

## 2.4 Aplicação de UUVs

Desde a década de 1990, robôs submarinos que navegam de forma autônoma, auxiliam em pesquisas oceanográficas e na exploração de petróleo e gás no fundo do mar e são produzidos por empresas de países como Estados Unidos, Noruega, Japão e França. No entanto, no Brasil, as pesquisas e os desenvolvimentos nessa área são recentes, sem muitos robôs submarinos que possam ser fabricado comercialmente (FAPESP, 2016).

Segundo Rocha (2012), em 2009, ao redor do mundo, estiveram em operação 629 AUVs, com estimativa de 1.150 veículos em 10 anos. Enquanto o número de ROVs de pequeno porte em operação seria de 1.000 em 2009. Estes números ilustram a relevância que UUVs possuem em operações subaquáticas. Segundo o autor, operações realizadas por um UUV podem ser classificadas como sendo de inspeção ou de intervenção em função de seu movimento durante a execução e de sua interação com o ambiente aquático. Nas operações de inspeção, o UUV não interage fisicamente com ambiente submarino se deslocando segundo uma trajetória predeterminada. O veículo é equipado com sensores para a coleta de dados do ambiente, mapeamento do leito marinho, supervisão ou vigilância. Em operações de intervenção ocorre a interação com o meio, podendo, exigir que o veículo permaneça parado em determinada posição.

Sørensen e Ludvigsen (2015) separam os sensores para veículos subaquáticos em dois grupos principais:

- **Sensores de serviço ou carga (*payload*, em tradução livre do inglês):** Têm a função de medir e coletar dados do ambiente, tanto para sensoriamento remoto quanto para a medição direta.
- **Sensores de navegação:** Instrumentos ligados à navegação do veículo e ao controle do trajeto. Não têm como alvo primário a coleta de dados objetivo da missão, mas são essenciais para orientação do veículo à sua localização.

Dentro do grupo de sensores de carga, os sensores voltados para inspeção da integridade física de estruturas submersas são:

- **Câmeras:** Câmeras de vídeo geram imagens óticas do leito e do meio subaquático. São fonte de informação qualitativa (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015), é o método mais confiável para identificar objetos no leito subaquático (SONAGLIO, 2017). Porém, muitas vezes a interpretação das imagens é um desafio. A visibilidade pode ser limitada devido à luminosidade e turbidez da região inspecionada.
- **Laser:** Laser (acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) são feixes concentrados de fótons monocromáticos e colimados (feixes de ondas paralelas). O sistema de inspeção emite sinais conhecidos (características físicas) e lê as respostas do meio. A posição dos pontos do objeto inspecionado é calculada a partir da diferença entre as características dos sinais emitido e recebido, tais como intensidade e ângulo, e esses dados permitem (SONAGLIO, 2017).
- **Sensores Acústicos:** Sensores acústicos baseiam-se na varredura da superfície visível através de uso de sonares, capturando dados através de diferentes faixas de frequências que são emitidas a partir de uma fonte, então refletidas pelas superfícies monitoradas e captadas posteriormente por um receptor. A escolha das faixas de frequência deve atender à estratégia de inspeção, pois, para cada intervalo, há uma resposta esperada, devido ao comportamento diverso da onda propagada ou refletida pelos meios. Estão incluídos como sensores acústicos Sonar Monofeixe, Sistema Sondador Multifeixe (SMF), geralmente utilizados em ecobatimetria, Sonar de Varredura Lateral (SVL) e o Sonar de Abertura Sintética (SAS) (SONAGLIO, 2017).
- **Magnetometria:** Magnetômetros são usados para localizar objetos construídos por mãos humanas, tais

como equipamentos, naufrágios e artefatos arqueológicos, assim como para medir características magnéticas de rochas. Seu funcionamento se baseia na interferência das estruturas no campo magnético gerado (SONAGLIO, 2017).

A outra classificação de sensores de navegação é constituída por:

- **Pressão:** Sensores de navegação como o de pressão determinam a profundidade com alta precisão, a partir do conhecimento da massa específica da água à temperatura medida (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015).
- **Direcionais:** Sensores direcionais fazem parte dos sensores de navegação que atendem à necessidade do veículo de controlar sua trajetória, medindo tanto a orientação em torno do eixo vertical principalmente com o uso de 3 métodos: rotação da terra, campo magnético terrestre e a posição relativa entre dois ou mais pontos, sendo este último o mais comum para trabalhos subaquáticos (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015).
- **Inerciais:** Sensores inerciais integram dados de aceleração e das taxas de mudança de ângulos de orientação no tempo é possível estimar a posição, ângulos de orientação, velocidade e aceleração (SONAGLIO, 2017).
- **GPS:** *NAVigation Satellite And Ranging Global Positioning System* cuja abreviatura é NAVSTAR GPS, mais popularmente conhecido como GPS, é um sistema de posicionamento absoluto em 3 dimensões, baseado em satélites orbitais artificiais que enviam sinais rádio para os receptores na terra (SONAGLIO, 2017).
- **Transponder:** São emissores de sinais que podem ser programados para enviar dados sobre localização. Esses emissores teriam sua localização absoluta conhecida, portanto serviriam como marcos de localização. Se forem fixos, assume-se que sua localização não sofre

alteração. O resultado esperado é o fornecimento de dados de localização para o veículo de modo a que ele possa se localizar em regiões onde não haja alcance para o sinal do GPS (SONAGLIO, 2017).

A divisão entre sensores de carga e sensores de navegação é mais metodológica do que prática, uma vez que, por exemplo, atividades de navegação podem empregar sensores de carga para sua realização. Essa classificação, no entanto, é útil no planejamento das tarefas dentro de um projeto de veículo (SONAGLIO, 2017).



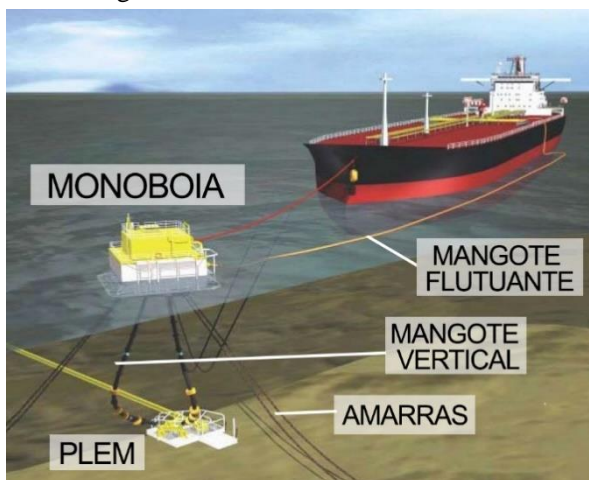
### 3 CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES ATUAIS

Neste capítulo são apresentadas as operações com as quais serão analisadas as aplicações de UUVs em águas rasas. Foram selecionadas três operações que são atualmente realizadas por mergulhadores. Os critérios de escolha decorreram da disponibilidade e acesso às informações necessárias de cada operação. A descrição da inspeção preventiva de amarras em uma monoboia é baseada na dissertação de Sonaglio (2017), enquanto os dados da inspeção de ADCPs e da Boia Meteorológica é resultado da prospecção em empresas de serviços oceanográficos, referenciadas de acordo com as permissões das mesmas. Atualmente, todas as inspeções envolvem o mergulho autônomo de até 20 metros, portanto obedecem ao regimento da NORMAM 15 (2016).

#### 3.1 Inspeção de uma Monoboia

Segundo Sonaglio (2017), monoboias são estruturas flutuantes com posição fixa no oceano por um sistema de fundeio, que possui a função de carga e descarga de petróleo e derivados de navios tanques. Conforme ilustrado na Figura 2, uma monoboia serve como intermediária entre dutos providos desde a costa com os navios, garantindo maior segurança para as operações.

Figura 2 - Sistema de uma Monoboia



Fonte: Marine Insight (2017).

De acordo com a norma PETROBRAS N-1812 (2006), o funcionamento genérico de uma monoboia se dá por um sistema de amarração por ponto único ou pela proa do navio, caracterizado pela liberdade de posicionamento da embarcação, segundo a resultante de ondas, ventos e correntes marítimas. As atividades de transferência de carga entre os navios e a monoboia seguem normas de inspeções prévias, em cada uma dessas operações tem-se como referência as normas para estruturas oceânicas regidas pela norma PETROBRÁS N-1812 (2006).

Afim de analisar uma operação de inspeção em uma monoboia, este trabalho aborda uma missão generalizada de inspeção preventiva entre um navio e uma monoboia, na qual as características são similares presentes na costa brasileira atualmente, de acordo com as descrições feitas por Sonaglio (2017). O autor afirma que as demandas de serviços de inspeção subaquática de uma monoboia em São Francisco do Sul são atendidas por mergulhadores capacitados para inspecionar e interagir com o sistema da monoboia. O serviço analisado é o de inspeção prévia de amarração do navio. A Tabela 3 apresenta as condições de operação da inspeção em questão.

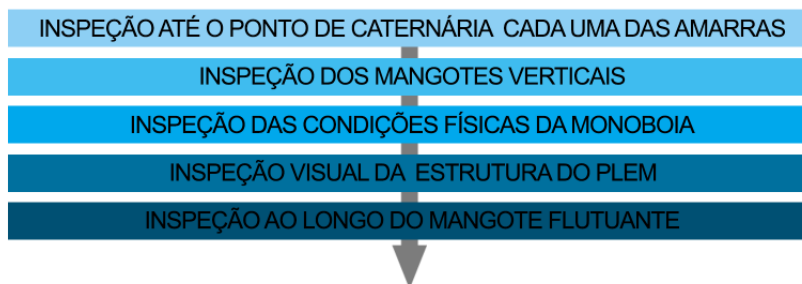
Tabela 3 - Condições de uma Inspeção da Monoboia

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Profundidade</b>                  | 23m   |
| <b>Pontos de Visualização</b>        | Ao longo dos dutos  |
| <b>Periodicidade</b>                 | 14 vezes por mês  |
| <b>Duração</b>                       | 40 min até 1h   |
| <b>Estrutura de Apoio Necessária</b> | Embarcação de Apoio, Equipamento de Mergulho segundo NORMAM 15 (2016) |
| <b>Número de mergulhadores</b>       | 2   |
| <b>Limitações Climáticas</b>         | Ondas, ventos e correntes oceânicas excessivas.                       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A operação de inspeção das amarras tem início com a chegada dos mergulhadores até as proximidades da monoboia utilizando uma embarcação de apoio. Em seguida, os mergulhadores realizam o mergulho para verificar as condições das correntes de fundeio da monoboia com o solo marinho, analisam as condições físicas e visuais do PLEM (do inglês, Pipeline End Manifold), do duto vertical, da monoboia e dos mangotes. Após a inspeção, os mergulhadores retornam para a embarcação de apoio. A Figura 3 apresenta um diagrama com as etapas da inspeção.

Figura 3 - Etapas de Inspeção de uma Monoboia

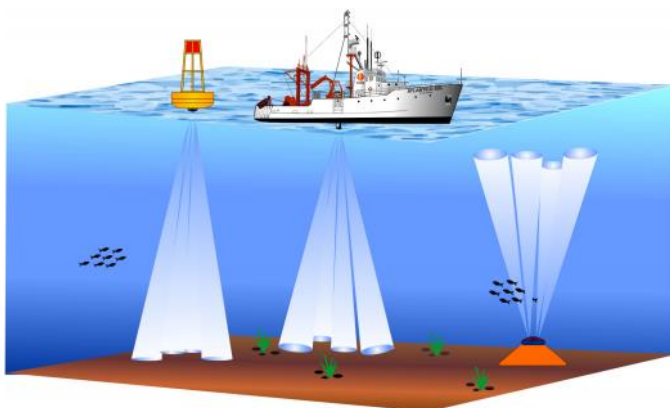


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

### 3.2 Inspeção de ADCPs Fundeados

Möller e Abe definem *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) como perfiladores acústicos utilizados para medir a direção e a velocidade de correntes por meio da reflexão de sinais sonoros de alta frequência em partículas de suspensão na água. A operação e o recolhimento de dados de perfiladores acústicos dependem da natureza de instalação dos mesmos, podendo ser: dinâmicos, quando a instalação ocorre em embarcações ou flutuadores; ou estáticos, quando colocados em pilares de pontes, paredões, margens de rios ou até fundeados, como representados na Figura 4.

Figura 4 - ADCPs em diferentes tipos de atividades.



Fonte: Möller e Abe (2012).

A forma como um ADCP é utilizado depende dos objetivos e demandas de projeto. Neste contexto, por meio de questionários, entrevistas e reuniões tornou-se possível estruturar uma operação de inspeção de ADCPs comumente realizada pela *NB Personal Divers*. A empresa é uma prestadora de serviços de operações oceanográficas e disponibilizou seus dados para elaboração deste trabalho. A empresa realiza operações com ADCPs fundeados em regiões próximas a estuários envolvendo etapas de lançamento, vistoria, manutenção e retirada do equipamento. Dentro dos objetivos do presente trabalho, serão abordadas apenas as operações de vistoria em ADCPs fundeados.

Inspeções visuais de ADCPs fundeados para verificar seu funcionamento e estado são necessárias, por mais que existam estruturas de fixação e proteção. Estas inspeções irão buscar identificar danos estruturais ou mudanças quanto ao posicionamento do equipamento. Atualmente o serviço de inspeção de ADCPs é realizado somente por mergulhadores seguindo as regulamentações da NORMAN-15. Os parâmetros levantados para caracterizar a operação são apresentados na Tabela 4.

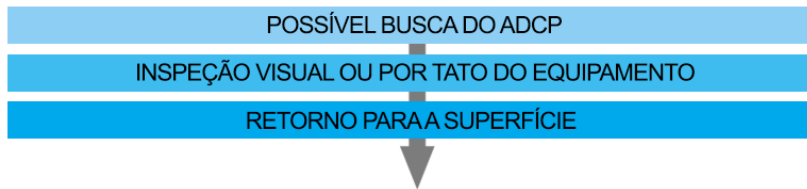
Tabela 4 - Características de Inspeção de ADCPs fundeados.

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Profundidade</b>                  | 20m   |
| <b>Pontos de Visualização</b>        | Uma Volta Completa  |
| <b>Periodicidade</b>                 | 1 mês   |
| <b>Duração</b>                       | 15 min  |
| <b>Estrutura de Apoio Necessária</b> | Embarcação de Apoio, Equipamento de Mergulho Autônomo até 20m segundo NORMAM 15(2016) |
| <b>Número de mergulhadores</b>       | 2   |
| <b>Limitações Climáticas</b>         | Excessivas ondulações, correntes ou vento   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A operação consiste inicialmente no mergulho em direção ao ADCP, etapa que pode ser dificultada em casos da mudança da posição do equipamento por conta de correntes. Uma vez encontrado o equipamento é realizada a inspeção visual de sua integridade estrutural. Se a visibilidade da água for baixa, é necessário realizar uma inspeção por tato. Os principais problemas registrados são relacionados ao posicionamento e orientação da estrutura. Realizada a inspeção e corrigidos os problemas, os mergulhadores retornam a superfície. A Figura 5 apresenta um diagrama com as etapas de inspeção de ADCPs.

Figura 5 - Etapas de Inspeção de ADCPs



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

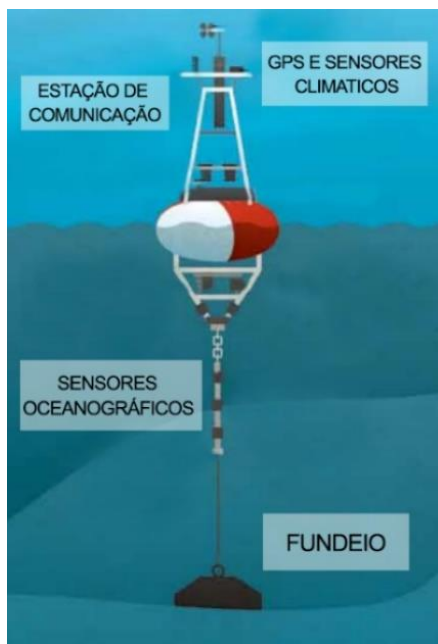
### 3.3 Inspeção de Boias Meteoceanográficas

De acordo com Souza (2016), boias meteoceanográficas são equipamentos utilizados para monitoramento das condições de mar. São capazes de coletar dados como: altura, comprimento, período, direção, frequência e velocidade de ondas. As informações coletadas são então transmitidas via rádio ou satélite até o local onde serão interpretadas. O sistema de fundeio das boias consiste em uma âncora acoplada a boia por meio de um cabo adequadamente solto de tal modo que permita a movimentação da boia. A Figura 6 ilustra o sistema de boias meteoceanográficas.

O sistema submerso e a fixação devem ser periodicamente inspecionados. Atualmente esta operação é realizada por mergulhadores contratados por prestadoras de serviços. Os dados para estruturar as operações de inspeção de sistema de ancoragem de boias meteoceanográficas, foram fornecidos por uma empresa que, atualmente, presta serviços de manutenção em equipamentos oceanográficos e sendo aqui referenciada como *Empresa A*.

Dentre os serviços prestados pela *Empresa A* com boias meteoceanográficas estão a inspeção visual, limpeza, e substituição de equipamentos do sistema de ancoragem flutuante e do sistema de meteorologia e oceanografia. Neste trabalho é estudado apenas o serviço de inspeção visual. A Tabela 5 apresenta as condições da inspeção.

Figura 6 - Ilustração de Boias Meteoceanográficas



Fonte: Adaptado de Silveira (2012).

Tabela 5 – Características de Operação em Boias Meteoceanográficas

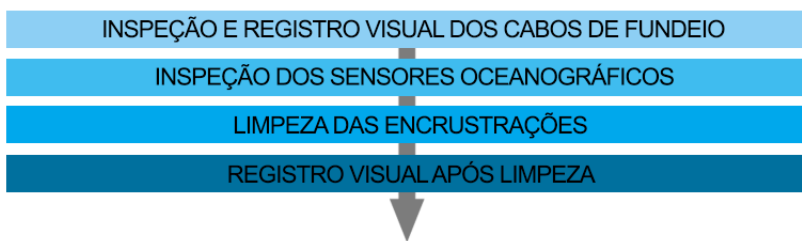
|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Profundidade                  | 16m  |
| Pontos de Visualização        | Ao longo do cabo   |
| Periodicidade                 | 1 mês  |
| Duração                       | 30min  |
| Estrutura de Apoio Necessária | Embarcação de Apoio, Equipamento de Mergulho Autônomo até 20m segundo NORMAM 15 (2016), Equipamento Fotográfico. |
| Número de mergulhadores       | 2  |
| Limitações Climáticas         | Ondas acima de 2m, ventos acima de 13 nós, baixa visibilidade da água.   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O mergulho até 16m também se encaixa na mesma classificação da DCP (2016) para mergulhos autônomos. Segundo representante da *Empresa A*, a operação é realizada seguindo as seguintes etapas:

Primeiro é realizada a navegação até a boia meteoceanográfica, onde em seguida é feito o mergulho. A inspeção dos cabos de fundeio tem início logo nos primeiros metros de mergulho, onde são feitos registros fotográficos das condições do sistema de ancoragem, com o objetivo principal de detectar acúmulo de incrustações ao longo dos cabos. Também é necessário conferir visualmente se não existem danos nos equipamentos que permanecem submersos. Após registros fotográficos os mergulhadores realizam a limpeza das incrustações e então retornam a superfície. A Figura 7 ilustra um diagrama com as etapas da inspeção.

Figura 7 - Etapas de Inspeção de Boias Meteoceanográficas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

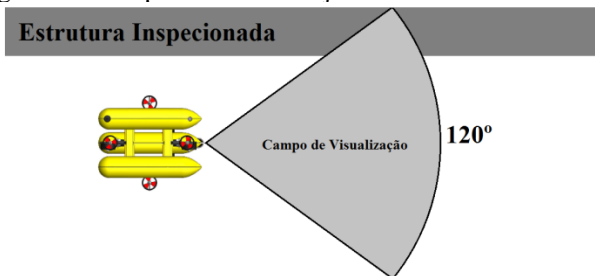
## 4 DESENVOLVIMENTO DE OPERAÇÕES COM UUVs

Este capítulo é destinado ao planejamento de operações com UUVs. Relatam-se as configurações das trajetórias das simulações de cada operação elaborada com uso de UUVs nas inspeções da Monoboia, do ADCP e da Boia Meteoceanográfica destinadas a estimar o tempo das inspeções.

É utilizado o Pacote de Simulação do AUV Girona 500 utilizado no ROS desempenhando o serviço de inspeção da integridade física das estruturas submersas. Visando abranger as trajetórias para o emprego de sensores de batimetria e/ou câmeras, os distanciamentos utilizados foram de até 7m da estrutura inspecionada, permitindo a diminuição desta distância. Sendo assim, para a monoboia foi utilizado o distanciamento máximo enquanto para o ADCP e para a Boia Meteoceanográfica os seus respectivos raios.

A posição do AUV em relação à estrutura inspecionada leva em consideração os ângulos de alcance dos sensores acoplados ao veículo, sendo de  $-90^\circ$  até  $45^\circ$  verticais em um arco de  $120^\circ$  horizontal (PALOMERAS, 2018). Assim, assume-se que o campo de visão do veículo permita coletar dados mesmo nos momentos em que a trajetória segue direção paralela a estrutura inspecionada, toma-se por hipótese que câmeras possuam graus de liberdade que permitam a coleta de imagem no mesmo campo de visualização de batimetrias. A Figura 8 ilustra esta situação.

Figura 8 - Campo de Visualização AUV Girona 500



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

### 4.1 Monoboia

Para elaborar o plano de inspeção preventiva de uma monoboia foi inicialmente realizada uma busca quanto a parâmetros reais.



Atualmente, em São Francisco do Sul/SC (Figura 9), encontra-se uma monoboia em atividade com seus dados publicados pelo portal de transparência da PETROBRAS. Portanto, tais informações foram utilizadas para construir um plano de operação.

Segundo o Portal de Transparência Pública do Terminal de São Francisco Do Sul (2017), os elementos inspecionados possuem as seguintes configurações:

- Monoboia com 12m de diâmetro e 16m de altura;
- 8 amarras dispostas radialmente equidistantes encostando o solo marinho a 50m da monoboia;
- 2 mangotes verticais;
- 1 PLEM;
- 1 mangote flutuante de 290m.

Figura 9 - Monoboia de São Francisco do Sul



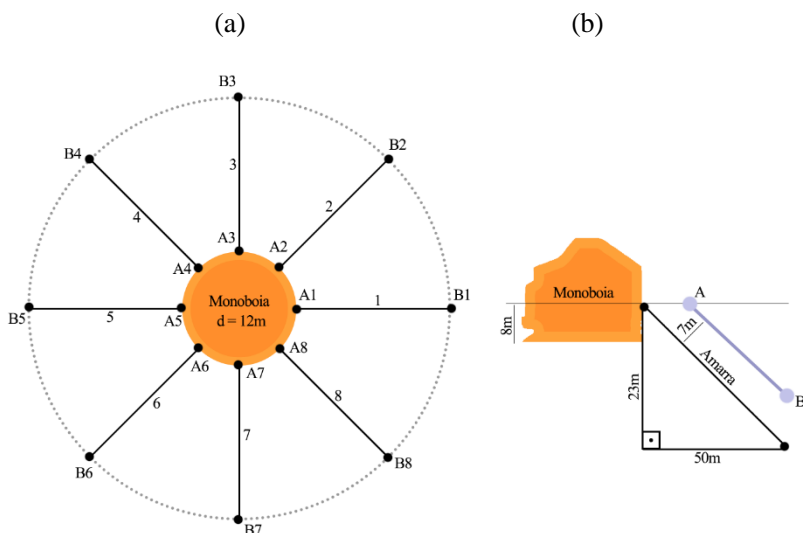
Fonte: Transpetro (2015).

Por acesso limitado aos dados quanto a posição das correntes de amarras e com o intuito de simplificar a análise, determinou-se que a posição dos cabos assumiria uma hipotética linearidade. Também se aproximou o ponto de conexão das amarras para posição de linha d'água da monoboia, com calado a 8m. Estas simplificações são representadas na Figura 10(b).

O planejamento da inspeção foi determinado com base nas etapas realizadas pelos mergulhadores. Na Figura 10(a) é representada a vista

superior da disposição das amarras numeradas de 1 a 8. Os pontos A e B representam os locais em que as amarras estão presas a monoboia e encostam o solo marinho de cada amarra, respectivamente.

Figura 10 - Configuração de Amarras da Monoboia

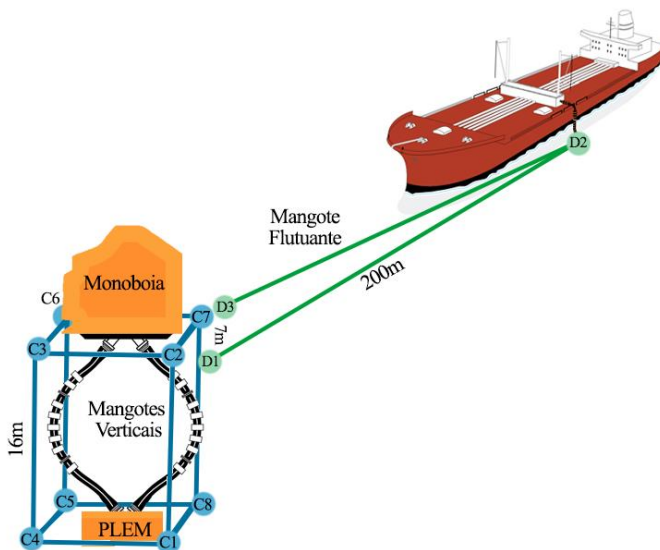


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para a inspeção do casco da monoboia, dos mangotes verticais e do PLEM foram elaboradas trajetórias para inspeção em quatro eixos verticais ao entorno da monoboia, nos ângulos das amarras 1, 3, 5 e 7.

Realizada a trajetória em volta da monoboia, o UUV navega horizontalmente por 200m ao longo do mangote flutuante. Os *waypoints* destinados a inspecionar o entorno da monoboia e ao longo do mangote flutuante são identificados com as letras C e D, respectivamente. A Figura 11 ilustra a disposição dos *waypoints*.

Figura 11 - Ilustração da Inspeção do PLEM e dos Mangotes



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A sequência dos *waypoints* consiste em atender a ordem das amarras, considerando apenas uma única inspeção por amarra. A transição de um trecho de inspeção ao outro deu-se priorizando o próximo *waypoints* de mesma profundidade, facilitando a operação. A Tabela 6 apresenta a sequência de *waypoints* e suas coordenadas. Foi definido como referencial a origem (0,0,0) sendo o centro da monoboia na linha d'água e com eixo  $z$  sendo positivo orientado para baixo.

Tabela 6 - *Waypoints* para Inspeção da Monoboia

| <b>Sequência de Waypoint</b>                     |                 |              |              |              |
|--|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Elemento Inspecionado</b>                     | <b>Waypoint</b> | <b>x [m]</b> | <b>y [m]</b> | <b>z [m]</b> |
| <b>Amarra 1</b>                                  | A1              | 13           | 0            | 0            |
|  | B1              | 48           | 0            | 16           |
| <b>Amarra 2</b>                                  | B2              | 34           | 34           | 16           |
|  | A2              | 9            | 9            | 0            |
| <b>Amarra 3</b>                                  | A3              | 0            | 13           | 0            |
|  | B3              | 0            | 48           | 16           |
| <b>Amarra 4</b>                                  | B4              | -34          | 34           | 16           |
|  | A4              | -9           | 9            | 0            |
| <b>Amarra 5</b>                                  | A5              | -13          | 0            | 0            |
|  | B5              | -48          | 0            | 16           |
| <b>Amarra 6</b>                                  | B6              | -34          | -34          | 16           |
|  | A6              | -9           | -9           | 0            |
| <b>Amarra 7</b>                                  | A7              | 0            | -13          | 0            |
|  | B7              | 0            | -48          | 16           |
| <b>Amarra 8</b>                                  | B8              | 34           | -34          | 16           |
|  | A8              | 9            | -9           | 0            |
| <b>Casco monoboia, PLEM e Mangotes Verticais</b> | C1              | 13           | 0            | 16           |
|  | C2              | 13           | 0            | 0            |
|  | C3              | 0            | 13           | 0            |
|  | C4              | 0            | 13           | 16           |
|  | C5              | -13          | 0            | 16           |
|  | C6              | -13          | 0            | 0            |
|  | C7              | 0            | -13          | 0            |
|  | C8              | 0            | -13          | 16           |
| <b>Mangote Flutuante</b>                         | D1              | 0            | -13          | 7            |
|  | D2              | 0            | -200         | 7            |
| <b>Retorno para a monoboia</b>                   | D3              | 0            | -13          | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

## 4.2 ADCPs

A operação de inspeção de ADCPs foi desenvolvida baseando-se inicialmente em sua geometria usual. Para fins de análise foram utilizadas as dimensões de um ADCP comercial *HydroSurveyor* (Figura 12) da marca *SonTek*, com 128,3mm de diâmetro e 259,3mm de comprimento. Segundo informações fornecidas pela empresa *NB Personal Divers*, as dimensões da estrutura de apoio não ultrapassam 1m. Portanto, a região do elemento inspecionado foi aproximada para um cubo de arestas iguais a 1m.

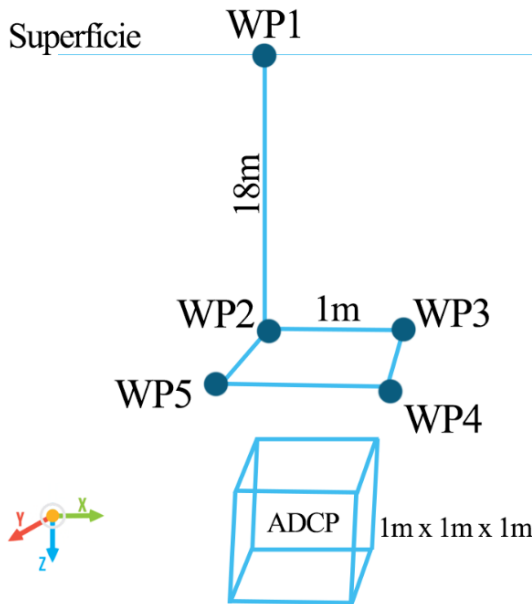
Figura 12 - ADCP HydroSurveyor



Fonte: SonTek (2018).

Para a determinação dos *waypoints* se considerou a hipótese de encontrar o ADCP no local correto, desta forma, o UUV se locomoveu da superfície em linha reta diretamente ao local de inspeção. A inspeção foi simulada com uma aproximação de 1m para coleta de dados visuais. A Figura 2 ilustra a operação e a Tabela 7 apresenta os *waypoints* em sequência da operação, tendo como origem o primeiro *waypoint*.

Figura 13 - Ilustração da Inspeção de ADCPs com UUVs



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tabela 7 - Sequência de *waypoints* para inspeção de ADCPs

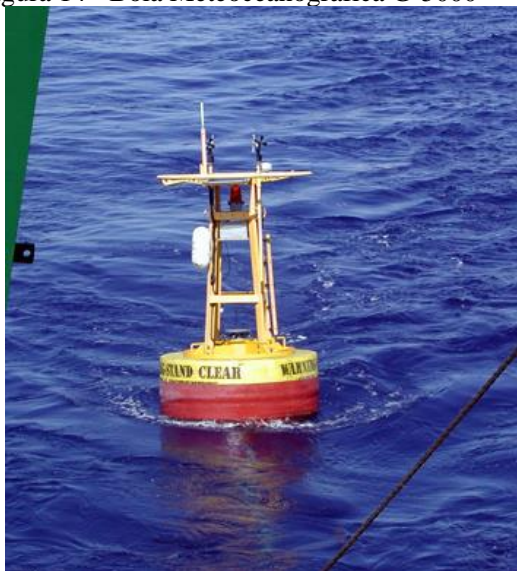
| Sequência de Coordenadas |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| Waypoint                 | x [m] | y [m] | z [m] |
| WP1                      | 0     | 0     | 0     |
| WP2                      | 0     | 0     | 18    |
| WP3                      | 1     | 0     | 18    |
| WP4                      | 1     | 1     | 18    |
| WP5                      | 0     | 1     | 18    |
| WP1                      | 0     | 0     | 18    |
| WP1                      | 0     | 0     | 0     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

### 4.3 Boia Meteoceanográfica

Boias Meteoceanográficas necessitam de inspeções que colem o estado de seus cabos de fixação e dos sensores oceanográficos que permanecem submersos conectados a ela. Nesta operação foram consideradas as dimensões de uma boia meteoceanográfica real desenvolvida pela *Mooring Systems, INC*. A boia escolhida foi o modelo G-5000 (Figura 14) por apresentar as maiores dimensões sendo seu diâmetro de 2082 mm e adotando para as condições de operação de 20m descritos pela *Empresa A*.

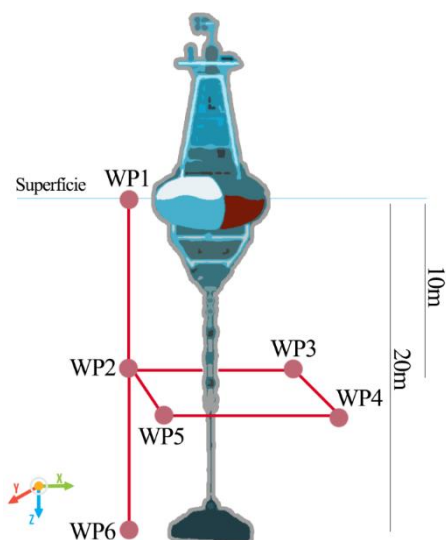
Figura 14 - Boia Meteoceanográfica G-5000



Fonte: *Mooring Systems* (2018).

Foi aceita a hipótese de que os sensores oceanográficos se encontravam na metade dos cabos de fixação, assim foi possível determinar o local para o UUV realizar uma inspeção mais abrangente em torno da estrutura. A Figura 15 ilustra a operação de inspeção da boia e a Tabela 6 apresenta os *waypoints*, novamente tendo como origem o primeiro *waypoint*.

Figura 15 - Ilustração da Inspeção da Boia Meteorológica com UUVs



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

#### 4.4 Simulações

A escolha do uso de simulações computacionais se deu por conta de limitações quanto a disponibilidade da aplicação prática dos UUVs. Sendo assim, cada simulação tem como objetivo estimar qual seria o tempo necessário para que um UUV pudesse realizar as tarefas de inspeção em discussão neste trabalho. Sugere-se nesta etapa que as simulações realizadas com os parâmetros do AUV Girona 500, possam ser extrapoladas para o uso de ROVs. Sem dúvidas adaptações devem ser levadas em consideração, como a presença de umbilical, distribuição de peso e manobrabilidade.

A visualização das simulações se deu por uso da ferramenta Rviz, sem a utilização de sensores, com o objetivo de estipular os tempos gastos por cada missão, os resultados são apresentados na Tabela 8, na Figura 16 podem ser observadas as trajetórias representadas pelo Rviz. As simulações possuem tolerâncias atribuídas ao posicionamento do AUV Girona 500 durante a trajetória, com o intuito de reproduzir os



efeitos de correntes marítimas, sendo de 2m para “x” e “y” e 1m para “z”. A velocidade de operação determinada pelos desenvolvedores é de 0,5m/s.

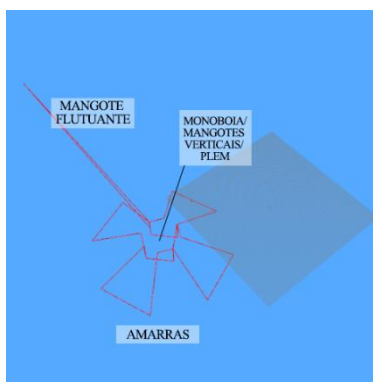
Tabela 8 - Duração das Simulações no ROS

|                           | <b>Duração</b> |
|---------------------------|----------------|
| <b>Monoboia</b>           | 43min e 42seg  |
| <b>ADCP</b>               | 3min e 28seg   |
| <b>Boia Meteorológica</b> | 4min e 14seg   |

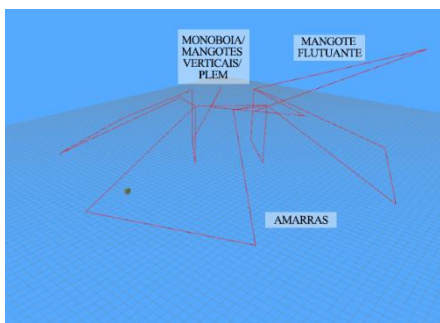
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 16 – Simulações das Missões com o pacote de simulação do AUV Girona 500.

(a) Vista Superior Monoboia



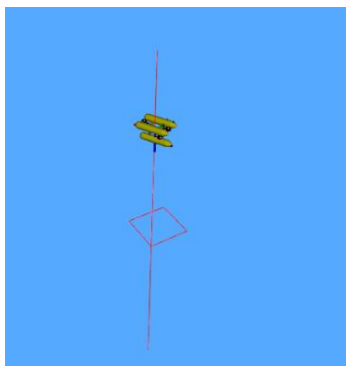
(b) Vista Perspectiva Monoboia



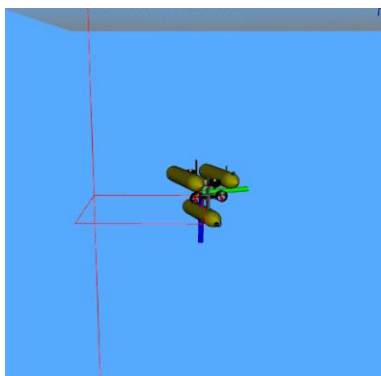
(c) Vista Perspectiva ADCP



(d) Visão Geral Boia Meteoceanográfica



(b) Curva Durante Inspeção Boia Meteoceanográfica



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise das Condições de Operação

O mar, como um ambiente de trabalho, apresenta diversos desafios, tanto para pessoas como para equipamentos por possuir condições adversas que podem colocar em risco os corpos que estiverem submersos, expondo-os a obstáculos físicos e/ou químicos. Portanto, é preciso delimitar as condições que podem comprometer uma operação, buscando sempre garantir a segurança humana em primeiro lugar, manter a qualidade da inspeção e não causar danos ao meio ambiente, ou ameniza-los. São diversas as razões que impedem que uma operação ocorra plenamente, dentre essas razões estão as condições climáticas, como a velocidade e direção do vento, intensidade das correntes marítimas, nevoeiros, tempestades e tamanho de onda. Ao se planejar missões em alto-mar, faz-se necessário considerar tais aspectos, tendo como base as normas de mergulho e navegação e até a própria experiência prática.

Ao serem questionadas quanto as limitações dos seus serviços de inspeção, as empresas informaram as seguintes condições limitantes: Para as inspeções tradicionais (com mergulhadores) a *Empresa A* relatou que ondas acima de 2m, ventos acima de 13 nós e baixa visibilidade da água, não permitem que suas operações ocorram. A empresa *NB Personal Divers* relatou apenas as condições limitantes estipuladas pela NORMAN-15 e relacionadas a embarcação de apoio.

As condições ambientais não são os principais fatores que limitam o uso UUVs voltados para observação e inspeção, como ROVs e AUVs, por possuírem a capacidade de manobra mesmo em situações adversas devido ao sistema propulsivo. Por outro lado, os fatores que podem limitar o uso de UUVs estão atrelados a capacidade de transporte e a qualidade do ambiente inspecionado. Os tamanhos e geometrias de UUVs são diversos e as embarcações que realizam seu transporte até o local de inspeção devem possuir em seu convés espaço que os comporte com folga para que os operadores possam manuseá-lo. A qualidade da água deve ser tal que os sensores não sofram interferência na coleta de dados e as características da região de inspeção. A presença excessiva de cardumes de peixes pode dificultar que AUVs consigam seguir a trajetória estipulada, ou permitir que ROVs tenham seus umbilicais enroscados na estrutura inspecionada, por exemplo.

Outro tópico levantado quanto as condições de operação foi a estrutura necessária para realização da inspeção. De acordo com as

empresas, para a inspeção tradicional são necessários mergulhadores capacitados para realização do serviço, equipamentos de mergulho autônomo exigidos pela NORMAN-15 e máquina fotográfica. Para UUVs são necessários operadores capazes de utilizar os *softwares* de comando e comunicação dos robôs, interpretar os dados coletados para verificar se há coerência na informação recebida, fazendo-se necessário haver noções da mecânica envolvida nos robôs para solucionar eventualidades que possam ocorrer. A operação com ROVs dependerá de pelo menos um computador com o sistema de controle devidamente instalado e de um auxiliar para controlar a movimentação do umbilical, operações como a da monoboia trazem consigo grandes desafios com o manuseio do umbilical entre as amarras e mangotes.

Quanto à segurança humana e ambiental durante a operação, sabe-se que mergulhadores muitas vezes colocam sua saúde em risco por trabalharem próximos às estruturas inspecionadas, como a monoboia. A utilização dos equipamentos de segurança em alguns casos pode não ser suficiente para impedir que danos maiores aconteçam com os mergulhadores. Defeitos de funcionamento dos equipamentos de mergulho também podem ser razões para incidentes durante as operações, ocasionando a interrupção imediata da operação. Por outro lado, UUVs não apresentam problemas diretos quanto a segurança humana em missões que operam sozinhos, porém podem causar erros de funcionamento durante a operação e comprometer a missão e a estrutura inspecionada.

A partir do entendimento das condições das operações fornecidas pelas empresas e por Sonaglio (2017), foi possível elaborar esta discussão. A Tabela 9 apresenta uma análise de *Benchmark* entre Mergulhadores, AUVs e ROVs para comparar os parâmetros aqui levantados quanto as condições de operação, utilizando os mergulhadores como método padrão. O indicador “0” é utilizado quando as características são neutras em relação ao padrão, “+” quando consideradas mais vantajosas e “-” quando inferiores, baseando-se nos critérios explicados discutidos.

Tabela 9 - Análise de Benchmark das Condições de Operação

|         |  | Mergulhador | AUVs | ROVs |
|---------|--|-------------|------|------|
| 1       | Comportamento em condições de mar adversas                   | 0           | +    | ++   |
| 2       | Equipe de apoio necessária                                   | 0           | ++   | +    |
| 3       | Quantidade de equipamentos de apoio necessários              | 0           | ++   | +    |
| 4       | Nível de capacitação da equipe                               | 0           | --   | -    |
| 5       | Versatilidade de operação em estruturas e sistemas complexos | 0           | 0    | -    |
| 6       | Nível de conhecimento prévio da região inspecionada          | 0           | -    | 0    |
| 8       | Nível de segurança humana                                    | 0           | +    | +    |
| Total 0 |  | 7           | 2    | 2    |
| Total + |  |             | 5    | 4    |
| Total - |  |             | 3    | 2    |

Fonte: Adaptado de Sonaglio (2017).

A partir desta análise foi possível observar que UUVs apresentam significativas vantagens frente ao trabalho de mergulhadores. No entanto, para contornar as suas limitações quanto ao meio de atuação, as inspeções devem ser planejadas especificamente para UUVs, rearranjando os pontos de coleta de dados e buscando técnicas que otimizem as trajetórias percorridas pelos UUVs.

## 5.2 Análise do Tempo de Trabalho em Campo

As atividades de inspeção subaquáticas aqui analisadas possuem durações diferentes devido ao número de *waypoints* de cada uma. Na monoboia, o número e as dimensões dos elementos inspecionados são maiores, se comparados a inspeção de ADCPs, por exemplo, impactando no tempo de cada inspeção.

A duração da inspeção impacta diretamente no planejamento da missão. O tempo dedicado a inspeção é um fator importante quando se tratando de atividades comportadas em cronogramas apertados, como a chegada de navios para transferência de material na monoboia, além de determinar os valores investidos na operação.

As simulações com pacote do AUV Girona 500 foram cronometradas e utilizadas para estipular o tempo de operação utilizando-se UUVs. A Tabela 10 apresenta as durações das operações realizadas por mergulhadores e pelo simulador do Girona 500.

Tabela 10 - Comparativo de Duração das Operações

|                               | <b>Mergulhador</b> | <b>Simulação<br/>Girona 500</b> |
|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| <b>Monoboia</b>               | 40min a 1h         | 43min e 42seg                   |
| <b>ADCP</b>                   | 15min              | 3min e 28seg                    |
| <b>Boia Meteoceanográfica</b> | 30min              | 4min e 14seg                    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os resultados obtidos para a inspeção da monoboia com UUVs foram muito próximos dos relatados por Sonaglio (2017), por outro lado, para inspeções de ADCPs e Boias Meteoceanográficas as durações de operação com UUVs apresentaram aproximadamente 10% do tempo do método tradicional. Porém algumas considerações devem ser feitas, as durações relatadas pelas empresas englobam atividades de intervenção, como retirada de incrustações nos cabos da boias e correções de posicionamento dos ADCPS. Outro fator importante quanto a inspeção de ADCPs é o tempo necessário nos casos em que ocorrem mudanças de posicionamento do equipamento, fazendo com que o mergulhador procure o mesmo. As simulações não levam em consideração as eventualidades de operação. Por exemplo, no emprego de ROVs, estas operações dependeriam de retiradas estratégicas do robô da água para evitar possíveis enroscamentos do umbilical na estrutura.

Portanto, entende-se que os valores podem ser interpretados como uma estipulação prévia das durações das atividades de inspeção sem nenhuma intervenção, para o alcance de resultados mais próximos da realidade seria necessário um nível de detalhamento em relação as operações atuais. Porém, em posse das grandezas observadas é possível especular que UUVs podem desempenhar as operações em menos tempo.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho permitiu observar que UUVs possuem potencial para serem empregados em atividades de inspeção em águas rasas. No entanto, é necessário que as demandas e condições de operação sejam condizentes para que as operações se tornem viáveis.

A partir dos dados coletados pelas empresas prestadoras de serviços subaquáticos, notou-se que UUVs são uma possível ferramenta adequada para suprir demandas de serviços em águas rasas. Um levantamento quanto aos custos envolvidos no emprego de um ROV de observação em operações de águas rasas é apresentado no Apêndice A.

De acordo com as análises feitas neste trabalho, UUVs têm potencial para não somente aperfeiçoar os procedimentos tradicionais de inspeção subaquática, mas também assegurar que seres humanos não sejam colocados em situações de risco.

As simulações elaboradas e as comparações realizadas permitiram perceber UUVs como uma importante e provável alternativa ao uso de mergulhadores, capaz de garantir a segurança de operadores e diminuir a probabilidade de acidentes durante atividades em alto mar em condições adversas. Acredita-se que o uso de inovações tecnológicas em operações submarinas possa promover ganhos em eficiência e abrangência nas atividades hoje empregadas somente por mergulhadores. Entretanto, percebe-se que existem limitações das funções de UUVs que fazem com que os serviços subaquáticos prestados em regiões costeiras ainda dependam dos métodos tradicionais.

É considerado crucial o desenvolvimento de tecnologias que estejam adaptadas às realidades de operação, para isso é importante que haja o interesse científico interdisciplinar envolvendo atividades de oceanografia, engenharia, robótica e demais áreas de conhecimento relacionadas.

### **6.1 Trabalhos Futuros**

Sugere-se que em trabalhos futuros sejam analisadas operações em condições adversas e realizadas aplicações práticas das inspeções com UUVs.

## REFERÊNCIAS

**AQUABOTIX. UUV Aquobotix Limited:** 2017 Annual Report. Disponível em: <<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/UUV/01956632.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

**ANTONELLI, Gianluca. Underwater Robots.** 2. ed. Cassino, Italy: Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.

**B&H. Aquabotix Endura 100 Mini ROV.** Disponível em: <[https://www.bhphotovideo.com/c/product/1284381-REG/aquabotix\\_03\\_endura\\_100\\_endura\\_mini\\_rov\\_100.html](https://www.bhphotovideo.com/c/product/1284381-REG/aquabotix_03_endura_100_endura_mini_rov_100.html)>. Acesso em: 06 jun. 2018.

**BRASIL, Trabalha. Média Salarial:** Função: Piloto de ROV. Disponível em: <<https://www.trabalhabrasil.com.br/media-salarial-para-piloto-de-rov>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

**DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. NORMAN-15:** Normas da Autoridade Marítima para Atividades Subaquáticas. Rio de Janeiro, RJ: Mts, 2016.

**FLORIANI, Bruno Locks; PALOMERAS, Narcís; WEIHMANN, Lucas. Model-Based Underwater Inspection via Viewpoint Planning using Octomap.** Santa Catarina, SC: MTS, 2017.

**JOSEPH, Lentin. Mastering ROS for Robotics Programming.** Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2015.

**KANTHARIA, Raunek. How Single Point Mooring (SPM) Offshore Operation Works?** Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/offshore/how-single-point-mooring-spm-offshore-operation-works/>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

**LAPIERRE, Lionel. Underwater Robots Part I: Current Systems and Problem Pose.** 2006. Disponível em: <[https://www.intechopen.com/books/mobile\\_robots\\_towards\\_new\\_applications/underwater\\_robots\\_part\\_i\\_\\_current\\_systems\\_and\\_problem\\_pose](https://www.intechopen.com/books/mobile_robots_towards_new_applications/underwater_robots_part_i__current_systems_and_problem_pose)>. Acesso em: 30 maio 2018.



MANLEY, Justin E. **Unmanned Maritime Vehicles: 20 Years of Commercial and Technical Evolution**. Kingston: IEEE, 2016.

O'KANE, Jason M.. **A Gentle Introduction to ROS**. Columbia, SC: ISBN, 2014.

MÖLLER JUNIOR, Osmar; ABE, Marcos Paulo. **Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático**. Pelotas: Editora Textos, 2011.

PALOMERAS, Narcís; HURTÓS, Nàtalia; CARRERAS, Marc; RIDAO, Pere. **Autonomous mapping of underwater 3D structures: from view planning to execution**. IEEE Robotics and Automation Letters. Standford, California, 2018.

PETROBRAS. **N-1812 – Estruturas Oceânicas**. .Rio de Janeiro. 2006.

ROCHA, Carlos Rodrigues. **Planejamento de Movimento de Sistemas Robóticos de Intervenção Subaquática Baseado na Teoria dos Helicoides**. 2012. 279 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

SILVEIRA, Evanildo da. Boias ao Mar. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 198, p.68-71, ago. 2012.

SONAGLIO, Rangel. **Tecnologias e Técnicas para Inspeção de Dutos e Estruturas Submarinas em Águas Rasas com AUV**. 2017. 217 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-ECM, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

SONTEK. **SonTek HydroSurveyor**: Software and Hydrographic Surveying ADCP. Disponível em:  
<[https://www.fondriest.com/pdf/sontek\\_hydrosurveyor\\_spec.pdf](https://www.fondriest.com/pdf/sontek_hydrosurveyor_spec.pdf)>.  
Acesso em: 02 jun. 2018.

SØRENSEN, A. J., & LUDVIGSEN, M. **Towards integrated autonomous underwater operations**. IFAC-PapersOnLine, 28(2), 107–118. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.018>

SOUZA, Lauro de. **As Bóias Meteorológicas:** Aonde estão no Brasil, como funcionam e para que servem?. 2016. Disponível em: <<http://www.surfconnect.com.br/as-boias-meteorologicas/>>. Acesso em: 30 maio 2018.

TEFRAN. **Port Information.** Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A9D2AFC5CEF9D15015D52517CAD374E>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

TRELLEBORG. **Mangotes KLELINE e SEALINE.** Disponível em: <[http://www.copabo.com.br/Anexo/Produto/Arquivo/Mangotes\\_KLELINE\\_e\\_SEALINE.pdf](http://www.copabo.com.br/Anexo/Produto/Arquivo/Mangotes_KLELINE_e_SEALINE.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2018.

WICHERS, Johan. **Guide to Single Point Moorings.** Houston: Wmooring, 2013.

## APÊNDICES

### Apêndice A – Levantamento de Custos

Nesta seção pretende-se abordar os aspectos que podem influenciar nos custos de uma inspeção. Os contratos de serviço estabelecem valores de acordo com as diárias necessárias para concluir a missão, incluindo as despesas com a estrutura e equipe de mergulho e apoio e transporte até o local da operação. As operações analisadas neste trabalho são de curto prazo e podem ser exercidas em até 2h dependendo das condições climáticas e de mar, no entanto, devido a periodicidade das inspeções é necessário um planejamento dos custos em função dos dias precisos para as missões.

Os valores informados das diárias para inspeção de ADCPs e Boias Meteoceanográficas são em média R\$3.000,00 por diária de missão, sendo R\$500,00 respectivos ao mergulhador. A estrutura necessária para utilização de UUVs dependerá do equipamento adquirido, em sua maioria, para AUVs e ROVs de observação até 100m depende-se de um computador e de dois operadores. Por possuírem comumente custos mais baixos e apresentarem sistemas menos complexos para operação, as estimativas de custos foram baseadas apenas em ROVs para estipular os gastos mínimos com o uso de UUVs.

Utilizaram-se os dados disponíveis do ROV de observação *Endura 100* da empresa *Aquabotix*, pois é apto para ser utilizado em inspeções como as analisadas. O robô *Endura 100* custa U\$17.000, adotando o valor do dólar a R\$3,85, sendo então R\$65.450,00. É importante ressaltar que este valor é referente ao produto completo e já estão inclusos o umbilical, a bateria e a mochila a prova d'água para o transporte do equipamento, que devem ser repostos junto ao ROV.

Para ROVs um operador é destinado a teleoperação do veículo e outro ao manuseio do umbilical. Os salários de operadores de ROVs são muito variáveis e dependem da complexidade da operação. De acordo com o portal Trabalha Brasil, o salário de um operador de ROV pleno para empresas pequenas é de R\$3.005,32. Cabe ao operador manter o ROV em boas condições para utilização, realizar manutenções periódicas que garantam a qualidade dos sistemas mecânicos, hidráulicos, elétricos e eletrônicos do equipamento. O salário de operadores júnior é estimado em R\$2.613,32, sendo suas atribuições auxiliar o operador pleno nas atividades em mar na manutenção. Nestes valores não são considerados os encargos trabalhistas.

O intuito desta análise foi observar os possíveis custos decorrentes do uso de ROVs. Entende-se que cada plano de operação possui características específicas, e, uma vez que UUVs não possuem normas que conduzam o seu uso, isso faz com que sejam possíveis alterações de acordo com a experiência e demanda dos serviços prestados.